

# 大功率高速永磁电机的电磁设计与损耗分析

欧金生, 沈贤锋, 于文昊, 王 索  
(湖南湘电动力有限公司, 湖南 湘潭 411101)

**摘 要:** 大功率高速永磁电机的损耗与温升等影响电机功率密度的提高。以 500 kW、12 000 r/min 高速永磁电机为例, 分析了电机极对数、定子绕组形式、转子结构、永磁体等对电机性能特别是损耗的影响。采用电机的有限元仿真模型, 对电机的转子结构强度、输出性能、损耗进行了分析计算。试制了样机并对相关性能进行试验验证, 分析计算与试验结果均表明, 电机达到了较高的技术指标要求, 为高速永磁电机的优化设计提供了参考。

**关键词:** 高速永磁电机; 损耗分析; 转子结构; 高效率

中图分类号: TM 355 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0046-06

doi: 10.12177/emca.2020.029

## Electromagnetic Design and Loss Analysis of High-Power and High-Speed Permanent Magnet Motor

OU Jinsheng, SHEN Xianfeng, YU Wenhao, WANG Suo  
(Xiangtan Electric Power Co., Ltd., Xiangtan 411101, China)

**Abstract:** The loss and temperature rise of high-power and high-speed permanent magnet motor affect the improvement of power density. Taking a 500 kW, 12 000 r/min high-speed permanent magnet motor as an example, the effects of the selection of pole-pair number, stator winding type, rotor structure and permanent magnet on motor performances, especially on loss, are analyzed. The finite element model of the motor is established, and the rotor structure strength, output performance and loss of the motor are analyzed and calculated. The prototype is trial-produced, and the relevant performances are tested and verified. The results show that the motor has reached a high technical target. It provides some meaningful references for the optimal design of high-speed permanent magnet motor.

**Key words:** high-speed permanent magnet motor; loss analysis; rotor structure; high efficiency

## 0 引 言

高速永磁电机功率密度大、体积小,可以有效节约材料<sup>[1]</sup>,另外,其高速直联可以提高系统效率,同时降低维护及运行成本。因此,高速永磁电机广泛应用于余热发电、飞轮储能机组、高速燃气轮发电机组、高速离心压缩机、鼓风机等工业领域<sup>[2-3]</sup>。目前,中国对高速永磁电机的研究与应用大多数停留在几十千瓦以下的小功率阶段<sup>[4]</sup>。随着单机容量及功率密度的进一步提升,大功率高速永磁电机的损耗与发热严重、温升过高、永磁

体失磁等问题变得更加突出<sup>[5-6]</sup>。如何保证电机在可承受的温升及高效率下运行,成为高速永磁电机向更大功率、更高功率密度发展的重要制约因素<sup>[7]</sup>。因此,高速永磁电机的损耗分析、优化设计与损耗抑制变得尤为重要。文献[8]提出一种适用于所有表贴式永磁电机转子涡流损耗的准确二维分析方法,并针对转子损耗进行了优化。文献[9]建立了非晶合金永磁同步电机磁场及损耗的有限元计算模型,对其定子铁耗进行了计算研究,为降低高速电机铁耗的定子结构优化提供了理论依据。文献[10]通过建立有限元模型,研究

收稿日期: 2020-02-17; 收到修改稿日期: 2020-04-10

作者简介: 欧金生(1983—), 硕士, 高级工程师, 研究方向为新型电机及控制。

了电机定子槽数、尺寸与绕组线圈对定子损耗的影响,研究结果为降低定子损耗提供了参考依据。文献[11]提出了一种满足性能要求且简单可靠的电机结构,并利用有限元仿真技术,计算了高速永磁电机的空载及负载特性和,验证了该结构的设计合理性。上述研究对电机损耗进行分析,对电机进行优化设计,对于高速永磁电机发展具有积极意义。

本文以 500 kW、12 000 r/min 有机朗肯循环(ORC)低温余热发电系统用高速永磁发电机为例,对高速永磁电机的电磁优化设计、损耗分析与抑制、转子结构等一些关键设计问题进行了分析与计算。

## 1 电磁设计参数的确定

### 1.1 技术指标要求

500 kW 高速永磁发电机的技术指标如表 1 所示。

表 1 500 kW 高速永磁发电机技术指标

| 参数名称                        | 参数值                     |
|-----------------------------|-------------------------|
| 额定功率/kW                     | 500                     |
| 额定电压/V                      | 380                     |
| 相数                          | 3                       |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 12 000                  |
| 功率因数                        | ≥0.95                   |
| 效率/%                        | ≥98                     |
| 质量/kg                       | ≤380                    |
| 冷却条件                        | 表面散热+少量高温氟利昂气体(约 100 ℃) |

### 1.2 主要尺寸的选择

与一般电机一致,高速永磁电机主要尺寸满足电机常数关系式<sup>[12]</sup>:

$$\frac{D^2 l_{ef} n}{P} = \frac{6.1}{\alpha'_p K_{Nm} K_{dp} A B_\delta} \quad (1)$$

式中: $D$  为电枢直径; $l_{ef}$  为电枢计算长度; $n$  为转速; $P$  为功率; $\alpha'_p$  为计算极弧系数; $K_{Nm}$  为气隙磁场波形系数; $K_{dp}$  为电枢绕组系数; $A$  为线负荷; $B_\delta$  为气隙磁密。

与一般电机相比,高速永磁电机的功率密度高、频率高、散热面积小,需选取相对较低的电磁负荷  $A$ 、 $B_\delta$ 。如果冷却条件得到加强,则可适当提高电磁负荷。

高速永磁电机转速高、极数少,较大的主要尺

寸比  $l_{ef}/D$  可降低转子的机械应力水平,缩短定子绕组端部尺寸以降低端部铜耗与温升,提高电机定子结构刚度与固有模态频率。因此,高速永磁电机一般采用较大  $l_{ef}/D$  尺寸比的“细长”型结构。

### 1.3 极对数的选取

给定电机运行转速,极对数决定电机的运行频率,并影响了定子绕组端部尺寸及定子铁心轭部尺寸。较大的极对数可有效缩短定子绕组端部尺寸及铁心轭部尺寸,以提高电机的功率密度。但较大的极对数对应电机频率亦高,导致电机的铁心损耗、集肤效应、涡流损耗等增加。同时,高速永磁电机一般与变流器(发电机)或变频器(电机)相匹配。过高的频率导致变流器或变频器的脉宽调制(PWM)调制较为困难,并增加变流器或变频器的损耗,影响整个系统的效率。

综合以上因素,本文设计实例选取极对数  $p=2$ ,对应的电机额定频率为 400 Hz。

### 1.4 定子设计

高速永磁电机频率相对较高时,为了降低铁心损耗,定子冲片需采用较薄的低损耗硅钢片。一般需选用 0.2 mm 及以下的硅钢片、软磁合金、非晶材料等。冲片越薄,铁心叠压系数越低,对冲模的要求也越高。软磁合金及非晶材料价格昂贵,铁心制造工艺较为复杂,与薄硅钢片相比,当电机频率高于 2 000 Hz 时,软磁材料才能有效降低铁心损耗<sup>[13]</sup>。综合考虑上述因素及电机额定工作点频率,本文设计实例定子铁心材料选用武钢生产的 0.2 mm 厚硅钢片 20WTG1500。

定子绕组结构形式一般分为“散嵌绕组”和“成型绕组”。部分高频电机也采用 litz 换位线作为绕组材料。与普通工频电机相比,高频高速永磁电机定子绕组的集肤效应更为明显,使得绕组附加交流损耗增加,导致效率降低<sup>[14]</sup>。litz 换位线可最大程度地降低集肤效应及绕组同导体股线间的环流损耗,但其成型与嵌线较为困难。与铜扁线制造的成型线圈相比,漆包圆线制造的散嵌绕组虽槽满率相对较低,但较大程度地降低了集肤效应,并可采用半闭口槽,减少槽开口对气隙磁密波形的影响。综合考虑以上因素,本文设计实例选用线径为 0.95 mm 漆包圆线多股并绕的“散嵌绕组”,定子槽开口尺寸为 2.2 mm。

为了降低或避免绕组同导体股线间的环流损

耗,一般需对绕组导线进行编织换位。“散嵌绕组”的编织换位在工艺实现上较为困难。为此,本文设计实例采用增加每槽导体数,减少每导体股线并绕根数来降低同导体间的环流损耗。在其他参数不变的情况下,每导体股线并绕根数与绕组并联路数成反比。因此,本文设计实例并联路数选取最大值  $a=4$ ,即与电机极数相等。

### 1.5 转子磁路结构设计

高速永磁电机转子大多采用表贴式磁路外加高强度金属或碳纤复合材料维护套的结构。该类结构在金属护套或永磁体中容易产生较大的涡流损耗,使得转子温升过高,导致永磁体失磁。浙江大学田占元<sup>[15]</sup>等提出在永磁体外增加一薄层非导磁金属屏蔽环来减小转子铁心、永磁体、护套损耗。但该方法应用于大功率永磁电机时,其制造工艺难以实现。本文采用一种表贴式永磁体概念的内置式转子结构,如图1所示。该结构可有效降低转子表面涡流损耗,其电机气隙值也可小于带护套转子结构,有利于提升电机功率密度。

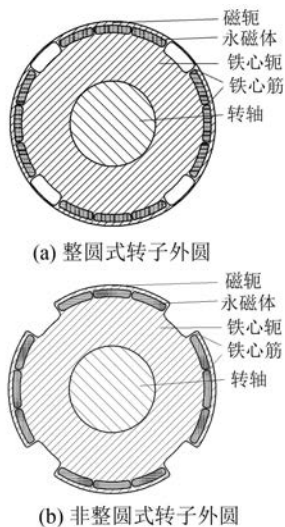


图1 转子磁路结构

该结构的转子主要由高机械强度冲片叠压而成的铁心(包括磁轭、铁心筋、铁心轭)、永磁体和转轴组成。图1(a)、图1(b)结构均属于表贴式永磁体概念的内置式永磁电机,区别在于图1(a)转子外径边缘为一个连续光滑的铁心整圆,两磁极间的弧形方孔来隔磁,以减小极间漏磁;图1(b)凸极转子磁极结构的极间漏磁较小,但在高速运行的转子风摩损耗远高于图1(a)结构。

本文设计实例以降低损耗、提高效率为目标,因此选用图1(a)结构。

该磁路结构磁轭的尺寸选取较为关键。磁轭高度越大,永磁体离气隙越远,永磁体内部涡流损耗越小。永磁体涡流损耗由气隙高次谐波磁场产生,磁场强度沿转子纵深方向衰减。一般地,磁场在导体中(磁轭)的衰减率用透入深度表示:

$$d = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}} \quad (2)$$

式中: $d$ 为谐波透入深度; $\mu$ 为材料的磁导率; $\sigma$ 为材料的电导率; $f$ 为谐波频率。

磁轭尺寸的确定,需计算气隙磁密各次谐波含量及透入深度,再综合考虑转子机械强度等因素。

由于存在离心力,高速电机转子半径与最大圆周角速度受到限制,主要根据冲片材料和永磁体的机械性能来优化设计转子冲片磁极结构及铁心筋尺寸。本文转子冲片选用首钢生产的0.35 mm厚高强度硅钢片 35WYS900,其抗拉强度  $\geq 900$  MPa。磁轭高度取 4.5 mm,每个磁极安排 4 个宽度为 1.5 mm 的铁心筋,确保转子磁极的机械强度,并将每极永磁体周向等分为 3 段插入其中。

### 1.6 永磁体材料的选取

为了提升高速永磁电机的功率密度,高速永磁电机一般选用高性能的稀土永磁材料,主要有钕铁硼和钕钴 2 种。稀土永磁体磁性能随温度的升高而降低,其工作温度  $T$  下的剩磁密度  $B_r$  可按式(3)进行计算<sup>[16]</sup>:

$$B_r = \left[ 1 + (T - 20) \frac{\alpha_{B_r}}{100} \right] \left( 1 - \frac{L_1}{100} \right) B_{r20} \quad (3)$$

式中: $\alpha_{B_r}$ 为  $B_r$  的可逆温度系数; $L_1$ 为  $B_r$  的不可逆损失率; $B_{r20}$ 为 20 °C 时的剩磁密度。

工作温度相对较低时,钕铁硼的磁性能高于钕钴。但钕钴耐温高(工作温度可达 250 ~ 350 °C),温度系数低,在高温条件下的磁性能更强。图2所示为 2 种常用钕铁硼和钕钴永磁体随温度变化的剩磁密度。图2表明,当工作温度超过一定温度后,钕钴 Sm2Co17 的剩磁密度  $B_r$  反而大于钕铁硼 N38EH。

此外,钕钴的化学稳定性要好于钕铁硼,但质量密度、电导率大于钕铁硼。该设计实例电机工

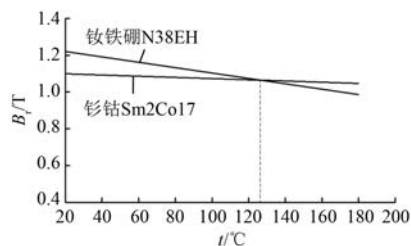


图2 2种永磁材料随温度变化的剩磁密度

业运行时转子周围冷却介质温度约达到 100 °C, 加上电机运行温升, 转子的实际工作温度较高。考虑上述因素, 永磁体选用钕钴 Sm2Co17 材料。

### 1.7 转子结构强度计算

高速永磁电机的转子结构强度较为关键。本文采用 ANSYS Workbench 软件 Static Structural 分析模块对转子强度进行仿真计算。因为转子是对称结构, 所以为了提高计算效率, 取转子 1/8 模型进行计算分析。将冲片、永磁体及转轴之间的接触均设定为摩擦接触, 转轴与冲片之间为过盈配合。具体模型和计算结果如图 3、图 4 所示。



图3 转子计算模型

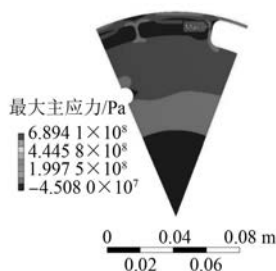


图4 机械应力分布

仿真计算得出额定转速下转子冲片局部最大应力为 689 MPa, 为拉应力, 位于磁极边缘隔磁桥处; 永磁体最大应力为 111 MPa, 为压应力, 均满足材料许用值要求。

## 2 电磁场有限元仿真计算

高速永磁电机的磁场与定子电流均存在大量的谐波, 如仍采用正弦工频的铁耗计算方法误差较大。为了准确计算定转子铁耗及永磁体涡流损耗, 需采用有限元法。另外, 磁路法计算式对电机的漏磁系数及空载反电动势的计算误差较大, 也需采用有限元法进行计算和校核。

根据设计实例, 利用 ANSYS 软件建立仿真分析模型。根据对称性, 取电机的 1/4 进行建模, 如图 5 所示。

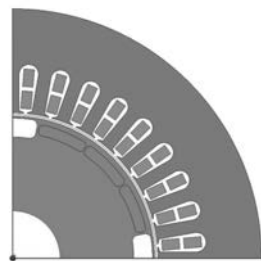


图5 有限元仿真模型

仿真分析的主要结果如图 6~图 11 所示。

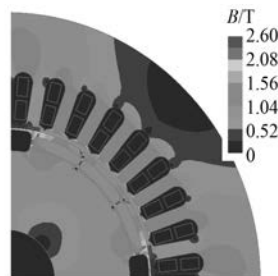


图6 磁密分布云图

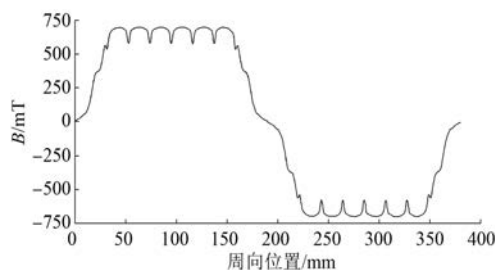


图7 一对极下气隙磁密波形

从图 6、图 7 可以看出, 由于定子采用半闭口槽, 电机气隙磁密受齿槽效应影响较小, 有效降低了气隙磁场谐波含量。转子铁心筋与磁极边缘隔

磁桥处磁密达到 2.3 T 以上,饱和度高,铁心筋数量的增加除增大漏磁系数外,对电机电抗的影响较小。

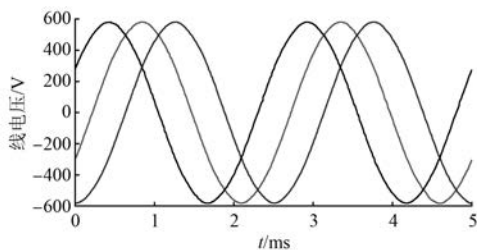


图8 空载三相线电压波形

从图8可以得出,电机的空载三相线电压(空载反电动势)有效值为 407 V,且波形的正弦性较好,通过傅里叶变换计算得出波形畸变率仅为 0.26%,满足国标不大于 5%的要求。

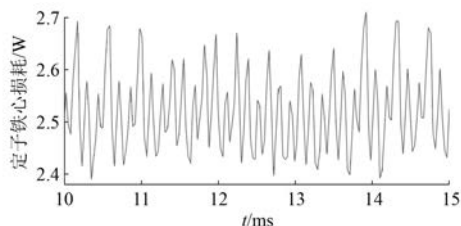


图9 定子铁心损耗

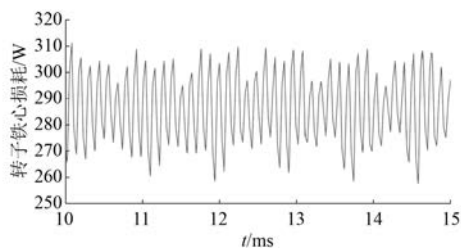


图10 转子铁心损耗

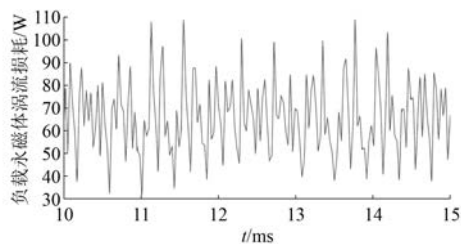


图11 永磁体涡流损耗

除定子铜耗、机械损耗和附加损耗外,负载

定子铁心损耗、转子铁心表面损耗、永磁体涡流损耗均采用有限元瞬态场计算。由图9~图11可以看出,定子铁心损耗平均值为 2 517 W,转子铁心损耗平均值为 287 W,永磁体内涡流损耗平均值为 66 W。

### 3 试验数据与分析

根据设计方案,制造了 1 台样机。采用耦合高速齿轮箱与拖动电机的方式搭建了试验台位,如图12所示。

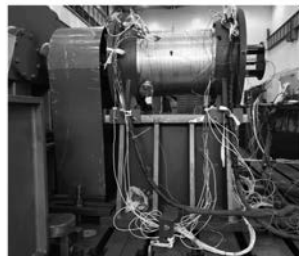


图12 样机试验台位

永磁电机空载损耗测试时,铁耗与机械损耗难以分离。设计实例永磁体为内置式,采用转子先不安装永磁体(也可永磁体先不冲磁),测出机械损耗后再安装永磁体进行试验的方式,测得电机的空载铁耗和机械损耗。

因为电机转子为高速旋转体,且永磁体内置,较难使用测温元件测得永磁体的温升值,所以本文采用在温升试验前测出电机的空载反电动势(冷态值),在温升试验结束时再测出电机的空载反电动势(热态值),通过对比换算的方式得出永磁体的温升值。

该方法是通过利用永磁体的热减磁、较为恒定的温度系数的特性,求得永磁体的平均温升值。永磁电机的空载反电动势与主磁通、永磁体剩磁密度  $B_r$  成正比。因此,利用电机空载反电动势的冷态值、热态值和式(3)可以换算出永磁体的实际工作温度及温升值。

从试验数据来看,电机的性能达到了表2规定的技术指标要求,且具有较高的效率、功率密度和较低的温升值。如电机冷却条件改善,提高温升限值,则可进一步提升电机功率密度。电机效率试验值略低于计算值,主要原因是与电机匹配的变流器给电机带来的附加损耗大于计算时的预设值。

表 2 电机性能指标计算值与试验值对比

| 项目                        | 计算或要求值 | 试验或测量值 |
|---------------------------|--------|--------|
| 额定功率/kW                   | 500    | 500    |
| 输出电压/V                    | 380    | 380    |
| 输出电流/A                    | 775    | 779    |
| 功率因数                      | 0.980  | 0.974  |
| 空载反电动势/V                  | 407    | 401    |
| 转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 12 000 | 12 000 |
| 效率/%                      | 98.4   | 98.2   |
| 定子温升/K                    | ≤75    | 68.6   |
| 永磁体温升/K                   | ≤150   | 73.2   |
| 质量/kg                     | ≤380   | 364    |

4 结 语

大功率高速永磁体电机功率密度高、体积小、散热面积小,容易导致电机温升过高,永磁体失磁等问题。因此,对电机进行优化设计和损耗抑制,得出如下结论:

(1) 定子铁心与绕组设计、转子磁极结构设计及机械强度性能仿真验证是高速永磁电机设计的重点,本文提出的高速电机转子磁路结构,涡流损耗较低,有效控制转子温升,降低了永磁体失磁的风险。

(2) 本文运用有限元分析软件进行电机仿真分析,并试制了样机进行样机性能试验测试验证。样机分析及试验结果表明,电机达到了较高的技术指标要求,特别是效率、功率密度值大大优于普通工业电机。

(3) 本文的分析计算过程与得出的结论对大功率高速永磁电机的设计具有一定的指导意义。

【参 考 文 献】

[ 1 ] 王凤翔.高速电机的设计特点及相关技术研究[J].沈阳工业大学学报,2006,28(3): 258.

[ 2 ] 王天煜,温福强,张凤阁,等.兆瓦级高速永磁电机转子多场耦合强度分析[J].电工技术学报,2018,33(19): 4508.

[ 3 ] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.高速电机发展与设计

综述[J].电工技术学报,2016,31(7): 1.

[ 4 ] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.1.12 MW 高速永磁电机不同冷却方案的温度场分析[J].电工技术学报,2014,29(增刊1): 66.

[ 5 ] 戴睿,张凤阁,王惠军.高速电机的特点与关键技术问题[J].风机技术,2019,61(4): 59.

[ 6 ] 董剑宁,黄允凯,金龙,等.高速永磁电机设计与分析技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(27): 4640.

[ 7 ] FAN J X,ZHANG C N,WANG Z F,et al. Thermal analysis of water cooled surface mount permanent magnet electric motor for electric vehicle[C] //2010 International Conference on Electrical Machines and Systems,2010.

[ 8 ] ETEMADREZAEI M,WOLMARANS J J,POLINDER H,et al. Precise calculation and optimization of rotor eddy current losses in high speed permanent magnet machine[C] //2012 XXth International Conference on Electrical Machines,2012.

[ 9 ] 刘明基,孙哲,詹阳,等.非晶合金高速永磁电机定子铁心空载损耗的分析计算[J].华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(5): 77.

[ 10 ] 苏德淳,王仲根,杨荣金.基于 Maxwell2D 的高速永磁同步电机磁场有限元分析[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2018,38(5): 20.

[ 11 ] 曹翼.高速永磁同步电机的电磁性能分析和计算[J].电气工程学报,2015,10(10): 75.

[ 12 ] 陈世坤.电机设计[M].2 版.北京:机械工业出版社,2000.

[ 13 ] 黄允凯,胡虔生,朱建国.顾及旋转铁耗的高速爪极电机三维磁热耦合分析[J].电工技术学报,2010,25(5): 54.

[ 14 ] 黄娜,杜光辉,宋晓茹.高速永磁同步电动机绕组交流损耗计算[J].电子世界,2019(6): 80.

[ 15 ] 田占元,祝长生,王珂.飞轮储能用高速永磁电机转子的涡流损耗[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(3): 451.

[ 16 ] 唐任远.现代永磁电机——理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.